

**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PISA**

**FACOLTA' D'INGEGNERIA**

**Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale**



**Tesi**

**STUDIO E MODELLAZIONE DEL  
COMPORTAMENTO DEFORMATIVO DI  
CORPO POMPA IN MATERIALE  
COMPOSITO A FIBRA CORTA**

Candidato:

**Baglini Massimo**

Relatori:

Prof. Ing. **Enrico Manfredi**

Prof. Ing. **Leonardo Bertini**

Correlatori:

Ing. **Girolamo Tripoli**

Ing. **Marco Trovi**

**ANNO ACCADEMICO 2004/2005**

---

# INDICE

<b><u>1. SOMMARIO</u></b>	<b>1</b>
<b><u>2. DESCRIZIONE E MODELLAZIONE CORPO POMPA</u></b>	
2.1 Corpo Pompa.....	3
2.2 Modellazione Corpo Pompa e Introduzione a Pro/MECHANICA® .....	9
2.2.1 Analisi agli Elementi Finiti: Introduzione.....	13
2.2.2 Approccio Classico: Convergenza di Elementi-H.....	16
2.2.3 Approccio di Pro/MECHANICA: Convergenza di Elementi-P.....	19
2.3 Modalità di Funzionamento e Modellazione con Pro/MECHANICA.....	24
2.3.1 Definizione del Materiale.....	33
2.3.2 Osservazione Conclusive sull'Orientamento del Materiale.....	41
<b><u>3. MATERIALI COMPOSITI</u></b>	
3.1 Introduzione ai Materiali Compositi.....	44
3.2 Materiali Compositi a Fibra Corta.....	52
3.3 Matrice.....	53
3.4 Fibra.....	57
<b><u>4. STAMPAGGIO AD INIEZIONE</u></b>	
4.1 Generalità sul Processo.....	61
4.2 Il Ciclo di Stampaggio.....	63
<b><u>5. COMPORTAMENTO ELASTICO DEI MATERIALI ANISOTROPI</u></b>	
5.1 Generalità.....	70
5.2 Materiali Elastici Lineari Ortotropi.....	73
5.2.1 Materiale Ortotropo.....	75
5.2.2 Materiale Trasversalmente Isotropo.....	78
5.2.3 Materiale Isotropo.....	79
5.3 Coefficiente di Poisson.....	81

## 6. MICROMECCANICA DELLA LAMINA

6.1 Generalità sulla Micromeccanica.....	83
6.2 Lamina Unidirezionale.....	84
6.3 Proprietà Elastiche della Lamina Unidirezionale.....	87
6.4 Effetto di Carichi Agenti in Direzioni Diverse dalle Direzioni Principali del Materiale.....	102
6.5 Proprietà Elastiche in un Piano di una Lamina con Fibre Lunghe Distribuite Casualmente (Random).....	106
6.6 Compositi a Fibre Corte.....	110
6.6.1 Trasferimento delle Tensioni.....	110
6.7 Caratterizzazione Analitica PP30%GF.....	124
6.7.1 Regola delle Miscele.....	127
6.7.2 Equazioni di Halpin-Tsai per i Compositi a Fibra Corta.....	127
6.7.3 Effetto di Carichi Agenti in Direzioni Diverse dalle Direzioni Principali Materiale.....	130
6.7.4 Proprietà Elastiche nel Piano con Distribuzione Random delle Fibre.....	132
6.7.5 Osservazioni.....	133
6.8 Effetto della Reale Lunghezza e Orientazione delle Fibre sulle Proprietà Elastiche del Materiale Composito.....	137
6.8.1 Influenza della Distribuzione della Lunghezza delle Fibre.....	142
6.8.2 Influenza della Distribuzione d'Orientamento delle Fibre nel Piano.....	143
6.8.3 Influenza della distribuzione d'Orientamento delle Fibre Fuori dal Piano.....	146
6.8.4 Conclusioni e Applicazione dei Risultati alla Caratterizzazione Analitica del Materiale.....	147

## 7. PROVE DI PRESSURIZZAZIONE DEL CORPO POMPA

7.1 Caratteristiche della Piastra.....	151
7.2 Calcoli Analitici sulla Piastra di Chiusura.....	156
7.2.1 Conclusioni su Resistenza e Deformabilità.....	162
7.3 Resistenza Viti di Collegamento Piastra di Chiusura-Corpo Pompa.....	163
7.4 Test e Rilevamento Dati.....	167
7.4.1 Prove di Scoppio.....	168
7.4.2 Rilevazioni Spostamenti.....	173
7.4.3 Spostamenti Rilevati.....	178

**8. MODELLAZIONE IN PRO/MECHANICA**

8.1 Definizioni Principali del Modello.....	183
8.2 Problematiche dell'Ortotropia.....	193
8.3 Semplificazione del Modello.....	195
8.4 Scomposizione del Corpo Attraverso l'Osservazione Visiva.....	198
8.4.1 Riepilogo e Osservazioni.....	204
8.5 Scomposizione del Corpo Attraverso Simulazione di Riempimento dello Stampo.....	206
8.5.1 Riepilogo e Osservazioni.....	211

**9. CARATTERIZZAZIONE DEL MATERIALE**

9.1 Generalità sulla Prova di Trazione.....	212
9.1.1 Prova di Trazione Statica.....	213
9.1.2 Elementi della Prova di Trazione Statica.....	214
9.1.3 Prova di Trazione ASTM D 638.....	217
9.2 Stampo per Provini.....	219
9.3 Prova e Macchina di Prova.....	223
9.4 Risultati delle Prove.....	226
9.5 Analisi dei Risultati.....	233

**10. RISULTATI COMPUTAZIONALI**

10.1 Dati di Riferimento.....	235
10.2 Analisi con Materiale Isotropo.....	238
10.2.1 Risultati e Osservazioni.....	240
10.2.2 Comparazione Sperimentale-Computazionale.....	246
10.3 Analisi con Materiale Trasversalmente Isotropo.....	247
10.3.1 Risultati e Osservazioni.....	248
10.3.2 Comparazione Sperimentale-Computazionale.....	259
10.4 Analisi con Materiale Ortotropo.....	262
10.4.1 Risultati e Osservazioni.....	263
10.4.2 Comparazione Sperimentale-Computazionale.....	265
10.5 Osservazioni sui Metodi di Convergenza.....	266
10.6 Analisi Critica dei Risultati.....	269

**11. CONCLUSIONI** 276**BIBLIOGRAFIA** 284

## Ringraziamenti

Desidero ringraziare l'azienda Eng & Mark (settore ricerca e sviluppo di Leader Pumps Group S.p.A.) che mi ha offerto la possibilità di svolgere questo lavoro al suo interno. Ringrazio i progettisti dell'azienda e i “ragazzi del laboratorio”. Ringrazio i *tutor* ing. Marco Trovi e Girolamo Tripoli, in particolare questo ultimo per il valido aiuto e la grande pazienza applicata.

Ringrazio il Prof. Manfredi Enrico, Prof. Bertini Leonardo e gli assistenti di laboratorio del dipartimento d'Ingegneria Meccanica dell'Università di Pisa per l'aiuto e la disponibilità dimostrata.

Ringrazio gli amici ingegneri compagni di studio per la collaborazione, l'aiuto e l'esempio d'attaccamento al lavoro: Canesi Nicola, Linari Stefano, Latini Elisa, Mantovani Matteo, Nannoni Giacomo (Digiuno), Ori Luca (Lucao), Rini Pietro.

E' doveroso anche un ringraziamento a tutti gli amici delle “grandi feste” pomeridiane ma soprattutto notturne.

Desidero rivolgere il ringraziamento più grande alla mia famiglia che mi ha sempre sostenuto e creduto in me.

# CAPITOLO 1

## Sommario

Nel novero dei costi legati alla progettazione e allo sviluppo di nuovi prodotti o all'implementazione di quanto già consolidato, entrano a buon titolo le voci connesse al processo induttivo di prototipazione, validazione sperimentale del prototipo e potenziali successive modifiche dell'oggetto.

La volontà di alleggerire questo processo ciclico, dispendioso anche in termini temporali, che spesso s'innesca in occasione della realizzazione di un nuovo prodotto, ha portato Leader Pumps Group S.p.A. (azienda presso la quale si è sviluppato lo stage interno al reparto "engineering and marketing") a dotarsi di un programma di calcolo strutturale (Pro-MECHANICA<sup>®</sup>) come strumento di supporto alla progettazione di nuovi componenti in materiale plastico o metallico (connettori, corpi pompa, giranti e accessori in senso lato...).

Il presente lavoro ha per oggetto l'applicazione del programma di calcolo strutturale ad un elemento in materiale plastico fibrorinforzato.

Le grandezze di riferimento in uscita dal programma strutturale sono gli spostamenti. Questo perché sperimentalmente, attraverso una semplice attrezzatura realizzata appositamente, sono stati rilevati gli spostamenti sotto carico d'alcuni punti del corpo pompa (strumenti comparatori).

Sostanzialmente quindi si ha un confronto tra dati sperimentali e dati analitici uscenti dal programma strutturale. La maggiore o minore discordanza dipenderà

ovviamente da una più o meno corretta modellizzazione della situazione sperimentale con il programma strutturale.

A tal proposito di fondamentale importanza è la caratterizzazione del materiale costituente il “corpo pompa” oggetto dello studio perché le plastiche fibrorinforzate (assimilabili ai materiali compositi) sono sostanzialmente anisotropi. Tale caratterizzazione è stata fatta sia per via analitica, attraverso relazioni che si trovano nella letteratura tecnica, sia per via sperimentalmente con prove di trazione realizzate presso il laboratorio d’Ingegneria Meccanica dell’Università di Pisa.

### SCHEMA DI LAVORO

